

АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ НИКЕЛИДА ТИТАНА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Гудимова Е.Ю.

*Руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Мейснер Л.Л.,
к.ф.-м.н. Остапенко М.Г.*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской
академии наук, г. Томск
e-mail: egu@ispms.tsc.ru

Известно, что никелид титана является широко востребованным сплавом, как в технике, так и в медицине. Однако высокая концентрация никеля (50 ат.%) и его возможный выход в соседствующую среду вследствие коррозии ограничивает его применение в качестве медицинского материала. Одним из перспективных методов повышения коррозионной стойкости поверхностных слоев никелида титана является электронно-пучковая импульсная обработка [1]. Воздействие потоками заряженных частиц на поверхность никелида титана приводит к возникновению остаточных упругих напряжений, наличие которых влияет на его физико-механические свойства. Наиболее информативными методами исследования структурно-фазовых состояний, оценки уровня индуцированных внутренних напряжений и процессов, связанных с их релаксацией, являются методы рентгеноструктурного анализа (РСА), с помощью которых можно получать достаточно точную информацию не только о величине остаточных напряжений в исследуемом материале, но и определять анизотропию упругих свойств, не подвергая образец разрушению.

Целью данной работы является оценка внутренних напряжений в поверхностных слоях никелида титана, модифицированных в результате импульсных воздействий электронными пучками низких энергий.

Сплав для исследований был выплавлен в электродуговой печи (с шестикратным переплавом слитка) из иодидного титана и никеля марки НО, взятых в эквиатомном соотношении. Слиток гомогенизировали при $T=1273$ К в течение 6 часов и затем охлаждали с печью. Приготовленные из слитка методом электроэрозионной резки образцы размерами $15 \times 15 \times 1$ мм после химической очистки поверхности подверглись заключительной термообработке – отжигу при температуре $T=1073$ К в течение 1 часа с последующим охлаждением в печи. После этого образцы электролитически отполировали. В результате, при комнатной температуре

исходные образцы сплава (далее – образцы TiNi) характеризовались двухфазным состоянием из основной фазы со структурой B2 (ОЦК, упорядоченная по типу CsCl, температура начала прямого мартенситного превращения $B2 \rightarrow B19'$ $M_H = 283K$, параметр решётки $a_{B2}^0 = 3.0132 \pm 0.0005 \text{ \AA}$ соответствовал составу $Ti_{49.5}Ni_{50.5}$) и небольшого количества ($< 5\%$ об.) фазы Ti_2Ni .

Исследуемые образцы подвергались облучению низкоэнергетическим ($U=15 \text{ кВ}$) сильноточным ($I=70 \text{ А}$) электронным пучком в условиях высокого вакуума ($\sim 10^{-6} \text{ Па}$) при плотности энергии в пучке $E=15 \text{ Дж/см}^2$ и $E=20 \text{ Дж/см}^2$. В результате быстрой закалки расплавленного электронным пучком наружного слоя материала на поверхности образцов образуется «перекристаллизованный» слой толщиной 8–10 мкм.

Рентгеноструктурные исследования структурно-фазовых состояний проводили при комнатной температуре на дифрактометре ДРОН-7 (Буревестник, Россия, ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН, г. Томск) в $Co-K_\alpha$ излучении (для отсеечения β -излучения использовали Fe-фильтр) и на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 (Shimadzu, Japan, ТМЦКП ТГУ, г. Томск) в $Cu-K_\alpha$ излучении (для отсеечения β -излучения использовали монохроматор). Для анализа фазового состава, структуры в поверхностных и более глубоких слоях использовали симметричные и асимметричные схемы съемок с углами скольжения $\alpha=3^\circ, 6^\circ, 12^\circ$.

Сравнение рентгеновских дифракционных картин, полученных по симметричным схемам съемки, исходного образца и образцов после облучения электронными пучками выявило наличие на рентгенограммах модифицированных образцов новых рефлексов, соответствующих мартенситной фазе со структурой B19', объемная доля которой составляет $\sim 10 \text{ об.}\%$. На рентгенограммах образцов после электронно-пучкового воздействия, полученных по асимметричным схемам съемки, при уменьшении угла скольжения α (уменьшении толщины анализируемого слоя) наблюдаются следующие эффекты. Во-первых, закономерное смещение всех рефлексов B2-фазы в область меньших углов относительно их положений, полученных при симметричной схеме съемок, что свидетельствует о наличии остаточных напряжений в модифицированных слоях. Во-вторых, уменьшение интенсивности рефлексов фазы B19' до величины близкой к нулю при минимальном угле скольжения, что свидетельствует об отсутствии мартенситной фазы в «перекристаллизованном» слое. Оценка величины остаточных напряжений проводилась по методу, описанному в работе [2], который позволяет учитывать градиентное изменение модуля упругости исследуемого материала. Согласно полученным данным величина остаточных напряжений максимальна в «перекристаллизованном» поверхностном слое и уменьшается при увеличении толщины анализируемого слоя (см.

таблица 1). На основании количественного фазового анализа и величины остаточных напряжений установлено, что уменьшение величины остаточных напряжений обусловлено снятием напряжений за счет образования мартенситной фазы В19', формирование которой в «перекристаллизованном» поверхностном слое затруднено.

Таблица 1 - Экспериментальные значения величины микродеформации решетки, остаточных напряжений и модуля упругости фазы В2 в приповерхностных слоях образца TiNi после электронно-пучковой обработки

Образец	E, Дж/см ²	Рефлекс	α,°	ε	E, ГПа	σ ¹¹⁰ , ГПа
№1	15	(110)	3	0.014	115	0.552
			6	0.0006	110	0.062
			12	0.0009	101	0.09
№2	20		3	0.005	113	0.552
			6	0.002	105	0.203
			12	0.0006	95	0.058

Таким образом, анализ рентгеновских данных показывает, что в результате электронно-пучковой обработки образцов TiNi образовался поверхностный «перекристаллизованный» слой, который можно рассматривать как концентратор внутренних напряжений, а природа экспериментально наблюдаемой мартенситной фазы В19' для всех образцов после электронно-пучковой модификации связана с мартенситным превращением под действием напряжений.

Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственный контракт № 16-522-11-2019-2).

Литература

1. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж.М. Поута, Г.Фоти, Д.К.Джекобсона. Перевод с англ. под ред. А.А. Углова. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
2. Мейснер Л.Л., Лотков А.А., Остапенко М.Г., Гудимова Е.Ю. Анализ методами рентгеновской дифрактометрии градиента внутренних напряжений в никелиде титана после электронно-пучковой обработки поверхности // Физическая мезомеханика. – 2012. – №6. С. 79-89